

**А. С. Луговская\*, Ж. Ч. Янушкевич, А. Н. Беляков**

Белгородский государственный университет, г. Белгород

*\*lugovskaya.anastasiya94@gmail.com*

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А. Н. Беляков

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Исследовано влияние деформационно-термической обработки на микроструктуру и механические свойства высокопрочной низкоуглеродистой стали типа S700MC. Для сравнительного анализа выбраны темпформинг (закалка с 1100 °С, отпуск и прокатка при 650 °С) и термомеханическая обработка (горячая прокатка с закалкой в масле). Деформационно-термическая обработка в обоих случаях приводит к значительному увеличению прочностных характеристик исследуемой стали, а также значений ударной вязкости в интервале температур от -196 до 20 °С. Темпформинг способствует формированию ультрамелкозернистой структуры, а термомеханическая обработка приводит к формированию структуры реечного мартенсита.

*Ключевые слова:* высокопрочная низкоуглеродистая сталь, темпформинг, ультрамелкозернистая структура.

**A. S. Lugovskaya, Zh. Ch. Yanushkevich, A. N. Belyakov**

## EFFECT OF THE THERMOMECHANICAL TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH LOW-CARBON STEEL

The effect of the thermomechanical treatment on the microstructure and mechanical properties of high-strength low-carbon S700MC steel was studied. Two methods of the thermomechanical treatment were chosen: conventional thermomechanical treatment and tempforming. The thermomechanical treatment in both cases led to significant increase in tensile strength and impact toughness at test temperature from -196 to 20°C. The tempforming resulted in the development of ultra-fine grained microstructure. The conventional thermomechanical treatment led to formation of lath martensite structure.

*Keywords:* high-strength low-carbon steel, tempforming, ultra-fine grained microstructure.

Совершенствование конструкций железнодорожных и автомобильных цистерн идет по пути уменьшения их веса, которое может

быть достигнуто за счет уменьшения толщины стенок. Однако для этого необходимо повысить прочностные характеристики сталей, из которых изготавливаются цистерны. Таким образом, это требует применения свариваемых сталей с пределом прочности, близким к 1000 МПа, и значениям ударной вязкости КСУ при  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  около 100 Дж/см<sup>2</sup>.

Высокопрочные низколегированные низкоуглеродистые стали в состоянии поставки не удовлетворяют предъявляемым требованиям: величина ударной вязкости КСУ при  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  менее 40 Дж/см<sup>2</sup>, предел прочности 750–950 МПа, относительное удлинение менее 11 %. Перспективными способами улучшения прочностных характеристик низколегированных сталей являются темпформинг (прокатка стали с эквивалентной деформацией порядка 1,7 после отпуска при температуре отпуска), сопровождающийся формированием ультрамелкозернистой структуры [1], и термомеханическая обработка [2]. Таким образом, целью данной работы является исследования микроструктуры и механических свойств стали типа S700MC, подвергнутой различным способам деформационно-термической обработки.

В качестве объекта исследований была выбрана высокопрочная низкоуглеродистая сталь типа S700MC (Fe – 0,09C – 0,12Si – 1,19Cr – 1,55Mn – 0,003P – 0,005S – 0,05Nb – 0,025Al – 0,05Ti – 0,42Mo – 0,09V – 0,003B). Стальной слиток был подвергнут гомогенизационному отжигу при температуре 1150 $^{\circ}\text{C}$  в течение 1 часа и ковке при температуре отжига с последующим охлаждением на воздухе. Полученная заготовка была подвергнута закалке при температуре 1100  $^{\circ}\text{C}$  с охлаждением в масле (исходная термообработка), после чего была получена мелкозернистая ферритная структура со средним размером зерна 5 мкм. В качестве деформационно-термической обработки были выбраны два способа. Первый способ включал термомеханическую обработку (ТМО), суть которой состоит в прокатке с понижением температуры от 1000  $^{\circ}\text{C}$  до 850  $^{\circ}\text{C}$  до истинной степени деформации  $\varepsilon \sim 0,9$ . Второй способ включал закалку с 1100  $^{\circ}\text{C}$ , отпуск при 650  $^{\circ}\text{C}$  в течение 1 часа и прокатку при температуре отпуска (темпформинг) до истинной степени деформации  $\varepsilon \sim 1,5$ .

Прокатка с понижением температуры приводит к формированию структуры реечного мартенсита (рис. 1, а). Величина исходного аустенитного зерна 18–20 мкм. Зерна, в свою очередь, состоят из пакетов, разделенных на блоки размером 1,5 мкм. Микроструктура высокопрочной низкоуглеродистой стали, сформировавшаяся в процессе темпформинга (рис. 1, б), состоит из вытянутых вдоль направления прокатки зерен. Темпформинг приводит к существенному измельчению микроструктуры – средний поперечный размер зерен составляет 530 нм.

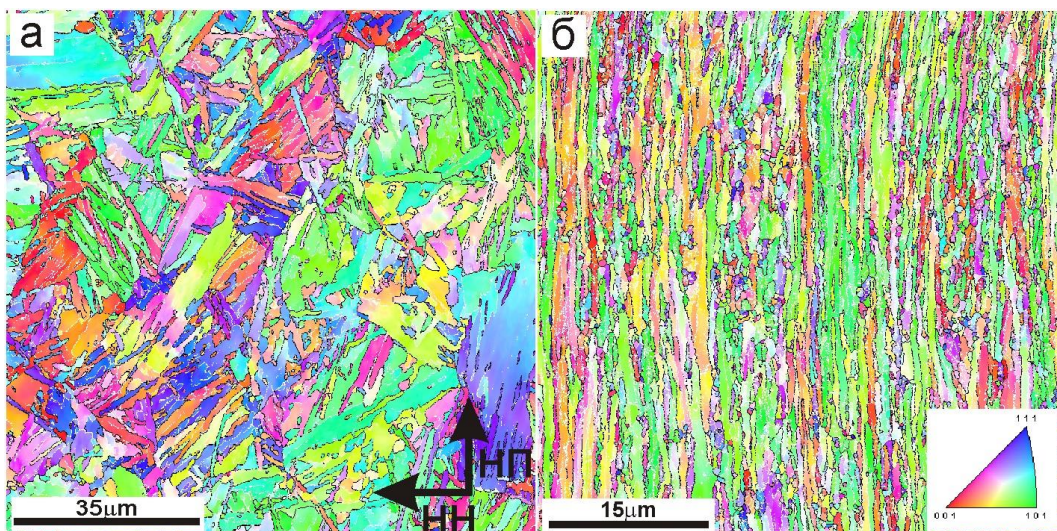


Рис. 1. Микроструктуры высокопрочной низкоуглеродистой стали типа S700MC после:  
*a* – ТМО, *б* – темпформинга

Деформационно-термическая обработка в обоих случаях приводит к существенному повышению прочностных характеристик исследуемой стали по сравнению с исходной обработкой. Термомеханическая обработка приводит к повышению предела текучести с 570 до 910 МПа и предела прочности с 795 до 980 МПа, а также к незначительному снижению пластичности с 17 до 13 %. Однако более эффективным способом повышения прочностных характеристик высокопрочной низкоуглеродистой стали типа S700MC является темпформинг. Предел прочности и предел текучести достигают 1110 и 1090 МПа (рис. 2). Повышение прочностных характеристик после темпформинга связано с формированием мелкозернистой слоистой микроструктуры.

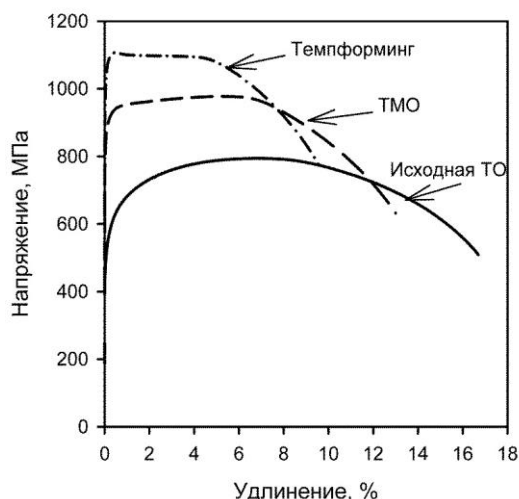


Рис. 2. Графики растяжения образцов стали типа S700MC при комнатной температуре

Исследования ударной вязкости стали типа S700MC показали, что деформационно-термическая обработка позволяет существенно повысить значения ударной вязкости как при комнатной, так и при отрицательных

температурах. После ТМО значения ударной вязкости при комнатной температуре выросли с 51 до 165 Дж/см<sup>2</sup> по сравнению с исходным состоянием (рис. 3, б). Ударная вязкость исследуемой стали, подвергнутой темпформингу, достигает максимального значения при температуре -40 °С ( $KCV_{-40^{\circ}\text{C}} > 463 \text{ Дж/см}^2$ ) с последующим снижением ударной вязкости при уменьшении температуры испытаний. Значение ударной вязкости при температуре жидкого азота  $KCV_{-196^{\circ}\text{C}} = 99 \text{ Дж/см}^2$  (рис. 3, в). При температурах от 20 до -90 °С наблюдается расслаивание структуры, которое происходит почти параллельно продольному направлению прокатки (рис. 4). При температуре -196 °С наблюдается зигзагообразное распространение трещины.

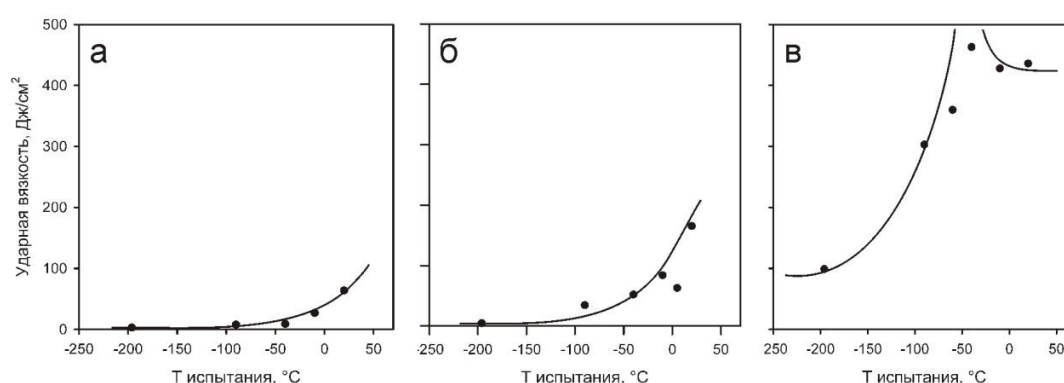


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости стали типа S700MC от температуры испытания после: а – исходной термообработки; б – ТМО; в – темпформинга



Рис. 4. Образцы стали типа S700MC после различных деформационно-термических обработок, подвергнутые испытанию на ударную вязкость при различных температурах

Таким образом, деформационно-термическая обработка является эффективным способом улучшения механических свойств стали. Темпформинг стали типа S700MC приводит к формированию

мелкозернистой структуры со средним поперечным размером зерна 530 нм. Предел прочности исследуемой стали, подвергнутой темпформингу, увеличивается с 795 до 1110 МПа. После темпформинга сталь демонстрирует высокую ударную вязкость, максимальное значение которой при температуре -40 °С более 463 Дж/см<sup>2</sup> с последующим снижением значений KCV до 99 Дж/см<sup>2</sup> при понижении температуры испытания до температуры жидкого азота.

На основании полученных данных можно заключить, что темпформинг приводит к формированию оптимального сочетания высоких прочностных свойств и значений ударной вязкости, что является определяющим фактором для выбора деформационно-термической обработки сталей данного класса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kimura Y., Inoue T., Tsuzaki K. Tempforming in medium-carbon low-alloy steel // Journal of Alloys and Compounds. 2013. V. 577. P. 5538–5542.
2. Гольштейн М. И., Грачев С. В., Векслер. Ю. Г. Специальные стали: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1985. 408 с.